

公衆 LTE を活用した移動機乗り込み作業安全化システムの構築

Development of Mobile Machine Entry Safety System Utilizing Public LTE

久保田雄紀 KUBOTA Yuki JFE スチール 技術ソリューション部 主査

要旨

JFE スチール東日本製鉄所（千葉地区）のコークス炉における移動機立入作業では、従来、無線連絡と無線連絡を受けた操作室オペレーターの属人的な管理に依存した運用により、認識相違による誤操作リスクが存在していた。そこで、作業者に配布済みのスマートデバイスと公衆 LTE を活用し、作業者自身が移動機の停止操作を確実に実行するシステムを構築した。スマートデバイスと公衆 LTE の可用性を最大限活用し設備追加を最小限とすることで、工事物量とシステム構築・維持管理コストを大幅に削減するとともに、制御系のフェイルセーフ設計や多層的なセキュリティ対策を施すことで、長期にわたり安定して運用できる仕組みを実現した。

Abstract:

During maintenance or inspection work involving mobile machines at the Chiba District, coke oven plant, the conventional procedure which relies on radio communication and operator-dependent actions in the control room posed risks of mis-operation due to recognition mismatches and person-dependent management. To address these issues, JFE Steel has developed a system that enables workers to reliably stop mobile machines using smart devices operating over a public LTE network. By fully leveraging the availability of smart devices and public LTE, the system minimizes additional equipment installation, significantly reducing construction workload and cost while improving operational usability. Furthermore, a fail-safe control design and multilayered security measures ensure safe and sustainable operation.

1. はじめに

JFE スチール東日本製鉄所（千葉地区）（以下、千葉地区）のコークス炉では、装炭車、押出機、ガイド車、消火電車など計 11 台の移動機（以下、移動機）が Factory Automation システム（以下、FA システム）による自動運転指令に基づき 24 時間連続で稼働している（図 1）。本コークス炉の移動機は基本的に無人で稼働しているが、補修、定期点検等の定期作業、およびトラブル対応などの突発作業のため、作業者が移動機へ乗り込む、あるいは移動機の走行範囲へ立ち入る必要が生じる（以下、立入）（図 2）。

立入の頻度は日によって変動し、多い日には累計 300 回を超えることもあるが、個々の立入作業の都度移動機を確実に停止し、作業者の安全を確保することが必要となる。しかし、複数の作業者が多くの進入ルートから同時に出入りすること、また入口と出口が異なること等の理由もあり、Molded Case Circuit Breaker (MCCB) による電源遮断や、ロックスイッチ等の一般的な安全措置が適用できない。

そのため、従来は、作業者がコークス炉の中央操作室へ無線で立入対象の移動機停止を依頼し、中央操作室のオペレーターが操作盤から自動指令を切ることで安全を確保していたが、通信の混線や聴き間違い、現場とオペレーターの認識相違等の潜在リスクが存在していた。さらに、各移動機への立入人数の把握はホワイトボードやマグネット配置などによって属人的に管理され、誤認識による操作のリスクもあった。

これらの課題を解決するための手段として、今回、作業

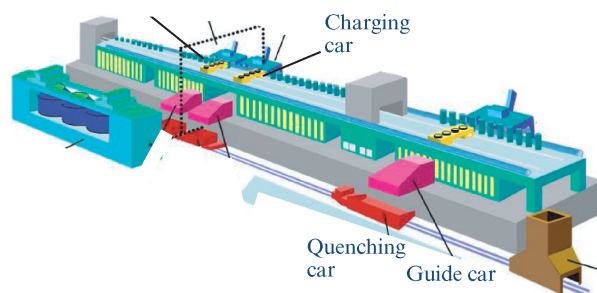


図 1 コークス工場における移動機配置

Fig. 1 Mobile machine alignment of coke oven plant

2026 年 4 月 9 日受付

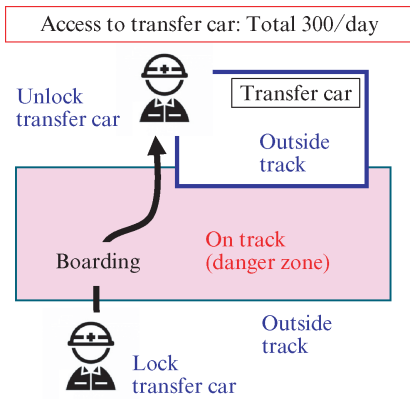


図 2 立入作業

Fig. 2 Image of entering mobile machine

者が所有するスマートデバイスと公衆 LTE の可用性を最大限に活用し、粉塵、高温、屋外といった過酷なコークス炉現場で、設備追加を最小限に抑えつつ、作業者自身が安全に移動機のロック/解除を行える、管理の属人性を排除したシステムを構築した¹⁾。

2. 背景と課題

本章では、立入作業に関する既存の運用における主な安全上の課題と、それらを解決するためのシステムの設計思想について述べる。

第一に、従来は作業者自身が停止操作を行うことができないため、中央操作室のオペレーターに停止操作を一任する運用となっていた。この課題に対しては、作業者自らが

ロック／解除操作を実施できる仕組みを構築し、「自らの安全を自分自身で確保できる」運用の実現をめざすこととした。

第二に、移動機自動運転指令の停止のみでは走行電源が活きた状態が残り、機上での手動走行操作が可能であることから、機上の操作者の誤認識により立入作業中に移動機を稼働させてしまうリスクが存在していた。この課題に対し、本システムでは、端末操作により発行される停止要求を FA システムに伝送し、移動機走行電源の接触器を開放して電源を物理的に遮断することで遠隔・機側問わず操作不可とする方針とした。

第三に、現場には多数の進入口が存在し、複数の作業者が複数の移動機に対して同時多発的に立入・退出を行う複雑な運用形態をとっており、属人的な管理では認識の誤りや抜け、漏れが発生する懸念があった。この課題に対しては、立入状況の属人的な管理を排除するため、これらの管理をすべてシステムで自動化する方針とした。

3. 実現方式の選定

前章で示した基本思想に基づき、検討したシステム構成案の比較結果を図 3 に示す。まず、すべての入退場口にハード式操作盤を設置する方式は、機器設置や電源敷設を含む工事物量が極めて大きく、コスト面で大きな負担となる。さらに、ハード操作盤では「誰が、どの移動機をロックしているか」をシステムとして管理できないため、複数作業者が同一エリアで作業する場合には、先行者が誤ってロックを解除してしまう危険が残存する。このように、コスト

Method	New control panels at all entrances	New dedicated devices at all entrances	Company-issued Smartphones
System			
Advantages	- Proven operational record - Easy to design and maintain (hardware circuit only)	- Ensures safety even when multiple personnel enter the area simultaneously - Personnel entry status can be monitored from the central control room	No dedicated device installation required, Easy to manage
Disadvantages	- Safety risk during multi-person entry - Entry status not visible in Control center	Difficult to deploy in harsh environments	- Security measures required - Smartphones required for outside cooperator
Construction cost	× Power supply and signal wiring required	△ Power supply and wireless infrastructure required	◎ No power supply or wireless infrastructure work required

図 3 方式比較

Fig. 3 Comparison of system architecture

面、安全面の双方で課題を抱える方式であった。

これらを踏まえ、本取り組みでは、各移動機への立入者を一元的に把握するため、スマートデバイスを活用することを基本方針とした。当初は、各入退場口に専用端末を常設し、閉域通信網で運用する方式も検討した。しかし、コークス工場特有の苛烈な環境では専用端末を長期間安定して運用・保守することが難しく、加えて端末充電に必要な電源工事にも多大な物量を要するという問題があった。

そこで、すでに作業員へ支給済みのスマートデバイスをそのまま活用する方式を採用した。コークス工場は電波環境が良好であり、公衆 LTE 網を利用すれば新たな無線インフラを構築する必要がない。また、端末管理を作業員個人単位で完結できるため、現場に充電設備を新設する必要もなく、結果として工事物量と初期投資を大幅に削減できる。

以上より、会社支給のスマートデバイスを用いる方式は、「誰が」「どの移動機を」ロックしているかを確実に把握できるうえ、工事物量の最小化と高い安全性、運用性を両立する最適解であると判断した。

4. 運用方法

本章では、本システムの導入により作業フローがどのように改善されたかについて、アプリケーションの操作手順と併せて説明する。

図 4 に示す従来フローでは、作業員が立入時に中央操作室へ無線連絡してロックを依頼し、オペレーターが操作盤で走行指令を手動で切り替え、作業員が現地で停止状態を確認した後に立入る運用であった。この方式では、ロック操作を作業員自身が実施できず、操作を他者に委ねる構造となっていた。さらに、立入人数の管理もマグネット等による属人的な方法に依存していたため、複数作業員が同時に立

入る場面では、残留者の見落としや誤った解除操作の危険性を排除できなかった。また、操作盤は誰でも操作可能であり、意図しないロック解除を完全に防止できないという構造的な限界もあった。

これに対し、図 5 に示す本システムの運用フローでは、作業員が携帯するスマートデバイスを用いて、ロック操作を現場で直接完結できるように運用体系を再構築した。作業員は立入開始時にアプリケーション上からロック要求を送信し、FA システムはこの要求を受けて移動機の走行電源を物理的に遮断する方式を採用している。これにより、従来のように「自動指令のみが停止され、機側操作が依然可能な状態」が残ることがなくなり、立入作業中に誤って移動機を動作させてしまうリスクを確実に排除した。また、ロック状態および各移動機への立入状況はシステムにより自動的に管理され、中央操作室の監視画面に加えて、各作業員のスマートデバイスにも即時に表示されるようにした。これにより、現場と中央の双方で状況認識の齟齬が生じることなく、複数作業員が同時に立入する場合でも、安全かつ確実に運用できるようになった。

アプリケーションの表示・操作イメージを図 6 に示す。アプリケーションは、作業員が確実に誤りなく操作できるよう、利用者認証、QR 認証、ロック要求、停止確認、退出操作といった一連の手順を段階的に提示する設計とした。なかでも QR 認証は、本システムにおいて重要な役割を果たす。スマートデバイスは公衆 LTE 網に接続できるため、工場外からでも通信そのものは可能であるが、現場の入退場口に設置された QR コードを読み取らなければロック/解除操作を実行できない仕様とすることで、現場以外の場所から誤って、あるいは意図的に操作が行われることを根本的に防止している。また、アプリケーションには対象移動機の状態や立入者情報が即時に表示されるため、作業員は現場で

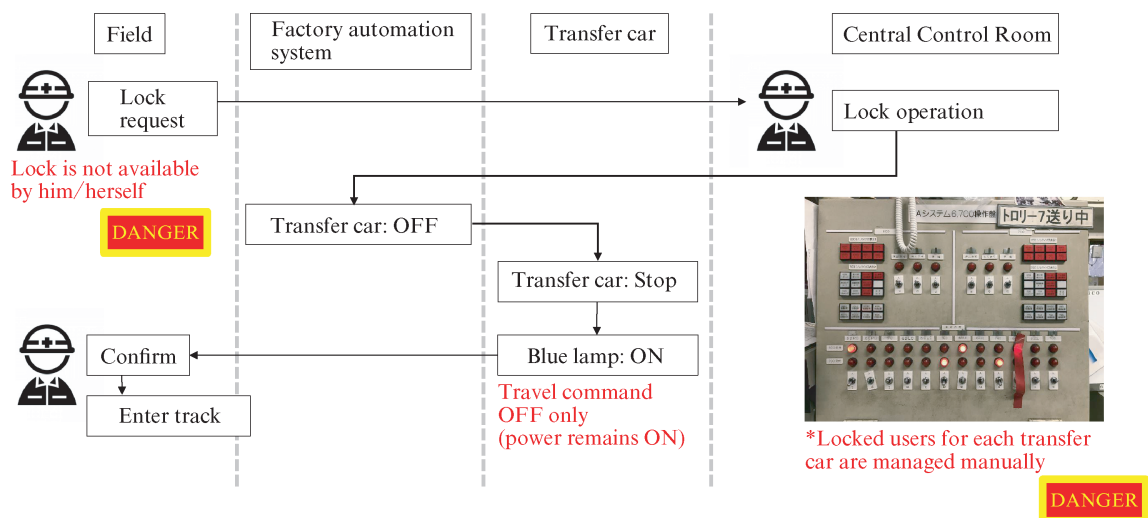


図 4 従来の運用

Fig. 4 Conventional procedure

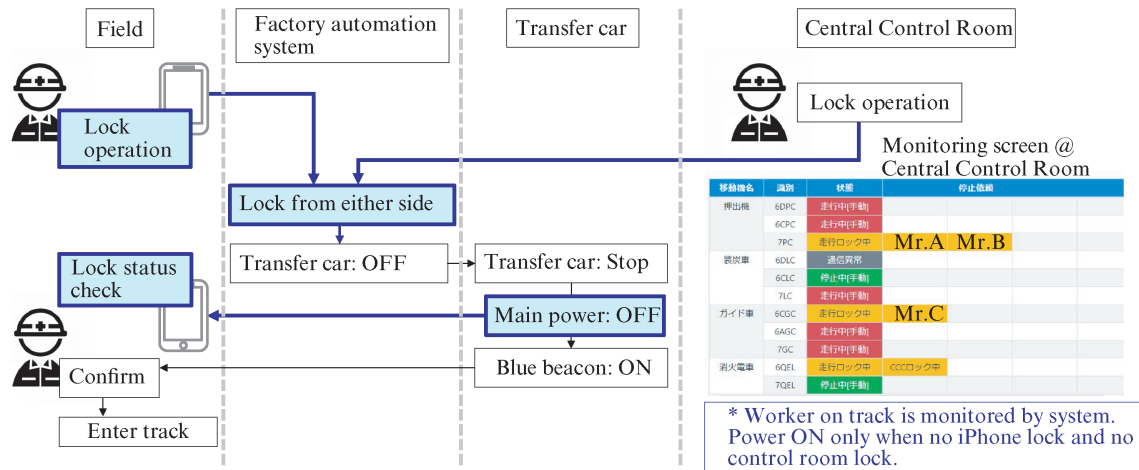


図5 システム立上げ後の運用

Fig. 5 New procedure with the system

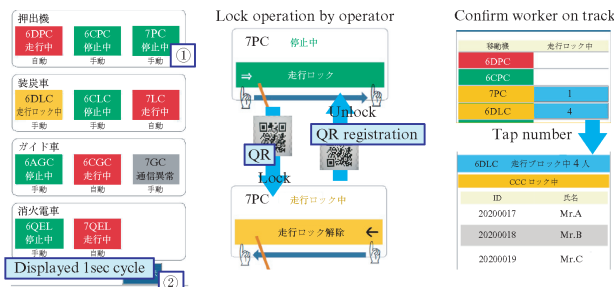


図6 アプリケーション表示・操作イメージ

Fig. 6 Application usage flow

移動機の稼働状況を容易に把握し、より迅速かつ確実に判断できる。

以上のように、本システムは従来のフローで顕在化していた課題を解消し、作業者自身が安全にロック操作を実施できる仕組み、QR 認証による操作位置の保証、走行電源の物理遮断による高い安全性、そして立入状況の自動管理および即時可視化をすべて実現した。これらにより、本システムは、従来方式では実現できなかった、安全性と運用効率を両立させる新たな立入管理方式と位置付けられる。

5. システム構成

本システムの構成を図7に示す。本システムは、スマートデバイス上の専用アプリケーション、公衆 LTE 網、通信ルーター、立入監視サーバー、FA システムとの連携用 PLC、そして FA システム（既存）によって構成される。

作業者はスマートデバイスで利用者認証および QR コード読み取りを行い、ロック/解除要求は公衆 LTE 通信を介してサーバーへ送信され、整合性確認後に FA システムへ伝送される。FA システムは走行電源の物理遮断や自己保持回路による安全保持を行い、立入監視サーバーは立入状況の一元

管理や稼働状況の監視を行う。

このような新たなシステムを現場で長期にわたり安定して使い続けるためには、運用上のさまざまなリスク（端末の故障、外部通信環境の変動、セキュリティリスク、スマートデバイスの頻繁な OS アップデート等）に対し、適切な対策を講じることが不可欠である。そこで本システムでは、制御系主体のフェイルセーフ設計、情報系の多層的なセキュリティ対策、OS 変化の影響を受けにくいアプリケーション構造の採用など多面的な工夫を施すことで、高い水準で安全性、保全性、運用性を維持しつつ、末永く安定利用できる基盤を整えている。以下で各対策について記載する。

5.1 フェイルセーフ系の構築

新しい仕組みを運用するうえで重要なのは、端末や通信系に異常が生じてても、安全が確実に保持されることである。本システムでは、ロック/解除指令を立入監視サーバーで保持せず、パルス信号として FA システムに伝送し、FA システムの自己保持回路で走行電源遮断状態を維持する方式とした（図8）。これにより、公衆 LTE 網の不具合、立入監視サーバーの障害、スマートデバイスの電池切れといった状況が生じてても安全状態は変化せず、意図しない復帰を避けることができる。

なお、復旧に長大な時間を要する場合でも操業への影響を避けられるよう、FA システム側に、本システムの無効化機能を設置し、既設の運用に切り替えて運転を継続できるようにしている。

5.2 セキュリティ対策

また、公衆 LTE を利用する以上、適切なセキュリティ対策も欠かせない。本システムでは通信を Transport Layer Security (TLS) で暗号化し、拠点ルーターの開放ポートを最小化することで外部露出を抑制した。端末側では Master

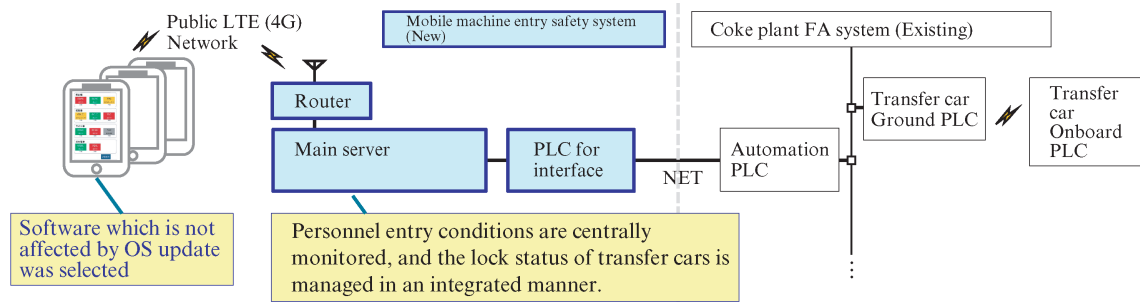


図 7 システム構成図

Fig. 7 System architecture

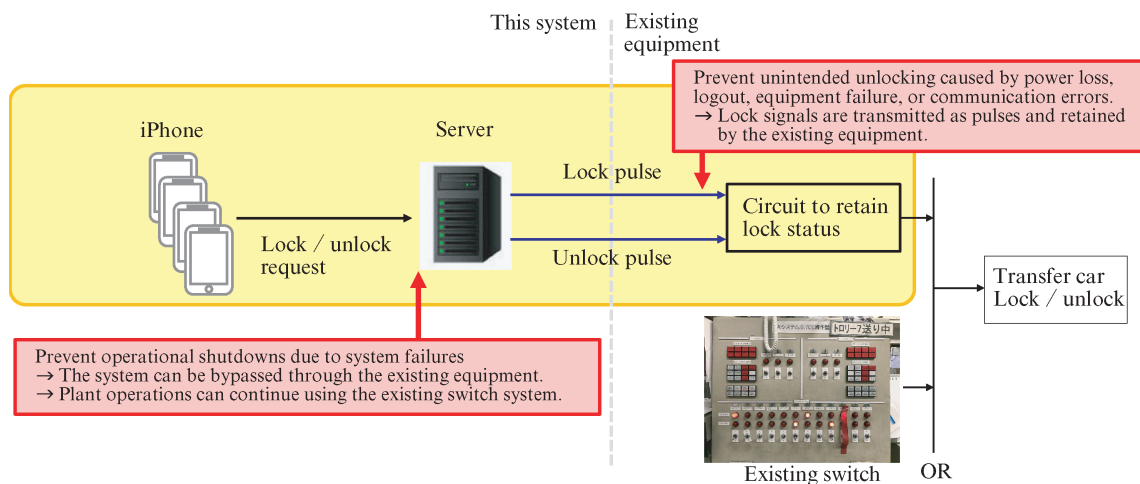


図 8 フェイルセーフの思想

Fig. 8 Outline of fail-safe philosophy

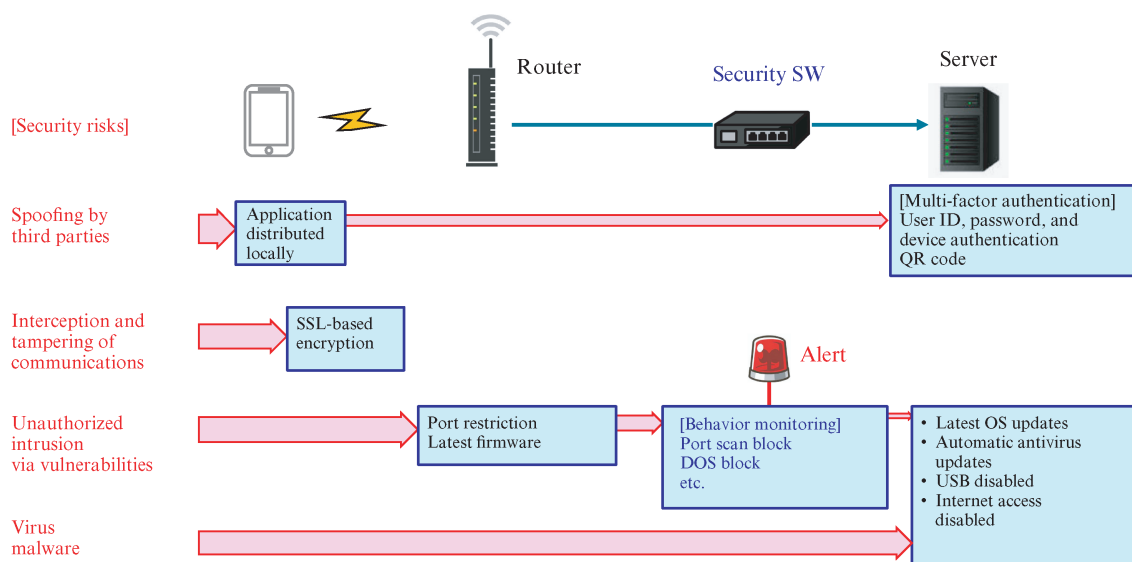


図 9 セキュリティ対策

Fig. 9 Security measures

Data Management (MDM) による構成統制を行い、脱獄端末の接続禁止、紛失時の遠隔ワイプといった運用管理面の強化を図っている。加えて、ネットワーク監視装置により

ポートスキャンや異常フロー、Denial of Service (DoS) 攻撃の兆候などを検知し、疑わしい通信を遮断する多段的な防御を構築した (図 9)。サーバーやルーター類の OS、

ファームウェアは定期更新を前提とし、稼働系と待機系を交互に更新する方式とすることで、不具合発生時でも即座にロールバックできるようにし、長期運用におけるセキュリティ維持と安定稼働を両立させている。

5.3 ソフトウェア更新への対策

さらに、スマートデバイス特有の課題として、頻繁に実施される OS アップデートによるアプリケーション動作への影響が挙げられる。一般的なネイティブアプリ方式では OS アップデートの度に改修が必要となり、長期運用の安定性を損なう恐れがある。これに対し本システムでは、アプリケーション処理をミドルウェア層で抽象化することで OS の差異を吸収できるアプリケーションを採用した。これにより、OS アップデートの影響を最小化し、アプリケーション側の改修量を大幅に低減するとともに、将来の端末変更 (Android/Windows タブレット等) にも対応し得る長期的な拡張性を備えている。加えて、OS 更新前には検証環境で動作確認を行う手順を整備し、現場運用への影響を抑制している。

6. おわりに

東日本製鉄所 (千葉地区) コークス工場において、作業者が自身のスマートデバイスを用いて移動機のロック/解除を確実に実施できるとともに、立入管理の自動化およびロック状態、立入状況の即時可視化を実現するシステムを構築した。これにより、立入作業および管理作業における属人性を排除し、立入作業の安全性が大幅に改善した。

本システムは、現場への新たな機器設置を不要とする構成に、フェイルセーフ設計および多層的なセキュリティ対策を組み合わせることで、立上げ以降トラブルなく安定稼働を継続している。現在では、オペレーター、保全要員、外注作業者を含む 100 名以上が日常的に利用している。

今後は、本インフラを活用し、現場作業者がスマートデバイス上で操業情報を確認できる仕組みの検討を進め、継続的な機能拡張を通じて、長期的に活用可能なシステムとして発展させる予定である。

参考文献

- 1) 小澤晃訓. 移動機乗り込み作業安全化. 日本鉄鋼協会 生産技術部門 第 170 回制御技術部会大会. 2024, p. 1-6.